

中国高速轨道交通空气动力学 研究进展及发展思考

田红旗

(1. 中南大学轨道交通安全教育重点实验室,长沙 410075; 2. 中南大学交通运输工程学院,长沙 410075)

[摘要] 总结了我国高速轨道交通空气动力学研究进程的起步、积累、发展、深化、提升和引领等六个阶段。论述了提出的以列车空气动力学、列车/线桥隧空气动力学、车/风/沙/雨/雪环境空气动力学、弓网空气动力学、人体空气动力学为主要内容的高速轨道交通空气动力学研究进展。包括发现探明了相关的形成机理、激化过程、响应特性、影响规律、减缓途径、改善措施,提炼出了一套基础理论,突破了系列关键技术,以及全面的工程应用。解决了空气动力制约高速铁路发展、恶劣风环境影响行车安全等关键科学技术问题。介绍了高速轨道交通空气动力学专用实验平台群,包括动模型实验系统、交变气动压力下人体舒适性/车体刚度/气密性综合实验装置、风/沙/雨/雪气动实验平台群、视觉检测系统、在线实车实验系统、兼用风洞群、数值仿真平台。最后讨论了正在开展的研究和进一步发展的思考。

[关键词] 轨道交通空气动力学;高速铁路;实验研究平台群;研究进展;列车空气动力学;列车/隧道耦合空气动力学;列车/风环境耦合空气动力学;弓网空气动力学;人体空气动力学

[中图分类号] U270.11 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)04-0030-12

1 前言

高速轨道交通是一个庞大的多学科支撑的巨系统。包括了诸如高速轨道交通空气动力学等关键基础科学与技术。高速轨道交通空气动力学是研究列车空气动力特性,列车周围空气运动规律,空气对列车和周围环境(线桥隧风沙等)的动作用、相互影响等规律,及其改善措施的科学^[1]。它是在解决高速轨道交通问题的工程需求推动下,形成和迅速发展起来的一门空气动力学分支学科,是空气动力学在高速轨道交通领域的应用和进一步发展。对于空气动力学来说它是一门应用科学,而对于发展高速轨道交通来说它又是一门基础科学。因此,高速轨道交通空气动力学具有很强的边缘性。属工业空气动力学范畴。

它不仅有类似航空航天飞行器的空气动力特性:空气阻力、空气升力、空气横向力、表面分布空气压力等;还有其特殊的空气动力特性:列车交会压力波、列车-隧道耦合空气动力特性、列车风影响下道旁人员与环境所受的空气动力特性、大风环境下列车空气动力特性、列车-桥梁(路堤)耦合空气动力特性等。需要建立适用于高速轨道交通的空气动力学研究方法和体系,开展专题研究。

2 中国高速轨道交通空气动力学研究进程

中国高速轨道交通空气动力学的研究大致经历了如下几个阶段。

1)20世纪80年代末期的起步阶段。伴随着国家发展高速铁路的重大需求,与航空航天科研机构全面合作,着手列车空气动力学方面的研究。

[收稿日期] 2015-01-07

[作者简介] 田红旗,1959年出生,女,河南鲁山人,教授,博士生导师,从事列车空气动力学和列车撞击动力学的科研与教学工作;
E-mail:thq@csu.edu.cn

2)“八五”期间的积累阶段。伴随着中国广深准高速铁路开通,发展了列车空气动力学数值模拟和相关实验技术。通过大量的风洞实验、在途实车实验、数值模拟及理论分析,开展了列车气动阻力、气动升力、表面分布压力、列车交会压力波、列车通风、人体在站台和道旁安全退避距离等方面的研究。完成了提速铁路、准高速铁路空气动力学行车安全评估。

3)“九五”期间的发展阶段。伴随着中国既有铁路大面积提速,提出流线型列车气动外形与车体结构一体化设计制造方法。研建了国际领先的“列车空气动力学动模型实验系统”,完善了列车气动性能数值模拟技术,开发120~500 km/h速度的列车空气动力学现场在线实车实验技术,建立了相应的行车安全评估方法。解决了中国提速铁路因空气动力危及行车安全、降低旅客舒适度、影响环境等科学技术问题。

4)“十五”期间的深化阶段。伴随着中国既有铁路全面提速,以及秦沈高速客运专线建成开通,构建了从理论分析、数值模拟到风洞实验、动模型实验、实车实验等较为完善的列车空气动力学研究体系。发现探明了相关形成及激化机理、特性及影响规律,提出了相应技术规范。研建了青藏铁路大风监测预警与行车指挥系统。完成了中国所有流线型列车外形结构设计,空气动力学线间距确定、列车/隧道耦合空气动力学性能优化。完成了中国所有提速和高速轨道交通的空气动力学性能研究、改善措施实施、行车安全评估。

5)“十一五”期间的提升阶段。伴随着高速铁路开行和CRH型动车组上线,构建中国轨道交通空气动力学基础研究、技术研发、工程应用体系。研建和提升了空气动力学方面的实验、计算平台,建立了高速轨道交通空气动力学性能设计、实验及评价标准。建立了列车空气动力学基础理论。完成中国300 km/h及其以上高速列车和高速隧道空气动力学参数确定、气动外形结构与优化等。解决了空气动力制约中国高速铁路发展、恶劣环境影响行车安全的科学技术问题。全面服务于高速轨道交通发展和国家自主创新战略。

6)“十二五”以来的引领阶段。伴随着中国快速铁路网的建成与运营,提出了以列车空气动力学、列车/线桥隧空气动力学、车/风/沙/雨/雪环境空气动力学、弓网空气动力学、人体空气动力学为主

要内容的高速轨道交通空气动力学。形成了高速轨道交通空气动力学专用实验平台群。建立了相应成套标准。构建了中国高速轨道交通空气动力学方面的安全行车立体防护体系。

3 列车空气动力学研究进展

以改善列车空气动力学性能为起点,最终落实到流线型列车气动外形结构研制。从减小气动阻力、降低交会压力波、减缓气动噪声、优化表面空气分布压力、控制空气升力和空气横向力、提高人体舒适性的思路入手,探明形成机理、影响因素、改善措施。形成列车空气动力学分析理论、关键技术、设计方法等体系。完成中国各型高速列车气动外形结构性设计^[2-4]。

3.1 高速列车周围流场湍流强度特性

列车周围流场湍流强度是描述列车风风速随时间和空间变化的程度。反映脉动风速的相对强度,是描述列车周围流场湍流运动特性的最重要的特征量。湍流强度量级一般分为4级:a.高湍流度,一般湍流度大于0.20;b.较高湍流度,一般湍流度在0.05~0.20;c.中度湍流度,较低速度(雷诺数)流动等,一般湍流度在0.01~0.05;d.低湍流度,一般湍流度小于0.01。大量研究表明,高速列车的头部及车身侧面流场湍流度最大在0.2以上。尾部侧面最大湍流度达到0.5。且越靠近列车表面,湍流度越大。按照上述湍流强度量级的划分,高速列车周围流场属于高湍流度的流动。

3.2 高速列车周围流场涡旋空间结构特性

当高速列车运动时,其周围的空气会产生许多瞬态的无规则的漩涡,这些漩涡在列车表面产生,发展并脱落,引起列车周围流场瞬态的速度波动。这些漩涡星系所特有的分布结构被称为列车周围流场涡旋结构。大量研究表明,高速列车的头部、尾部、底部、车辆连接部位周围以及尾流区域的漩涡分布密集。列车车身规则等截面部位的漩涡非常少。因此,漩涡主要源于复杂突变以及曲率变化大的表面结构。列车的头部、尾部、底部、车辆连接部位、以及尾流区域漩涡分布密集,是漩涡产生的主要位置。

3.3 高速列车表面附面层演变特性

当列车运动时,由于空气的黏性,在列车外表面将形成一流体层。沿列车壁面法向向外,流体层由流速为零迅速升高到与来流速度基本一致。该

流体层称之为列车外表面附面层。附面层厚度是指附面层内的速度达到主流速度某一百分数时距离壁面的法向距离,该百分数一般为99%。

大量研究表明,a.流线型列车头部的附面层非常薄,接近于零;b.在流线型头部与车身连接处,附面层出现分离,产生较大的速度梯度;c.从连接处向后沿列车长度方向,附面层厚度不断迅速增加,至中后部以后再缓慢增加;d.在列车横截面外廓线周围,列车侧中上部和顶部的附面层厚度基本相当。列车侧下部的附面层厚度最大,约是列车侧中上部附面层厚度的两倍;e.对于列车底面,约在5/8列车头车长度的位置,附面层厚度呈线性增加到车体下表面距离地面的厚度,之后沿列车长度方向一直保持这个厚度;f.在列车尾端,附面层变化为类似球状。

3.4 成套原创性理论关系式

成套原创性理论关系式^[5-9]主要包括:a.列车交会压力波与列车速度、线间距、车体宽度、附面层厚度的系列理论关系式;b.列车外形参数与列车空气阻力、空气升力、空气横向力、交会压力波的成套理论关系式;c.列车表面附面层厚度理论关系式;d.列车中各车辆空气阻力构成及估算公式。

3.5 高速列车气动外形的形性设计优化

通过对高速列车气动外形的形性研究,得到列车流线型头部长度、纵向剖面形状、俯视形状、各主型线组成的耦合外形与列车交会压力波、空气阻力、空气升力、空气横向力、列车表面压力分布的关系,探明列车车体的底部外形、车体截面外廓形状对列车空气动力性能的影响规律^[10-13]。

制定了列车气动外形设计准则。包括:a.列车外形、头部和尾部外形均为流线型,车体表面应尽可能光滑平整,无凸出外表面的窗玻璃压条及门扶手等;b.车身断面形状应采用鼓形,或者采用折线形式的侧墙以圆弧与车顶和车底罩相连;c.将列车底部除转向架外用封闭外罩全部包裹起来;d.列车编组,车身断面形状应尽可能相同,不同断面形状车体混编时,应设置平滑过渡导流罩;e.列车车头、受电弓、牵引缓冲装置、车体底部、车辆连接处、把手、缝隙、凹槽等部位避免产生涡流;f.须满足司机室净空、瞭望条件。

创建了降低高速列车气动力、交会压力波、隧道交变压力及气压爆破,提高气压变化下人体舒适性的高速列车外形结构协同设计、轻量化与辅助制

造方法,完成39种已投入运营的流线型列车外形结构设计。

3.6 高速列车气动结构设计优化

通过高速列车结构设计优化,进一步改善高速列车空气动力性能和解决相关空气动力学问题。主要包括:a.转向架区域防积雪气动性能设计优化;b.车辆间连接优良气动外形过渡;c.设备舱导流罩承受气动载荷能力设计;d.改善动力设备冷却场分布的气动结构设计;e.抗交变气动载荷作用的车体、车窗玻璃结构设计;f.抗风沙(石)冲击的车体结构设计;g.抗风沙尘空调机组气动结构设计;h.高速列车通风系统结构优化设计;i.受电弓及其导流罩气动结构设计优化;j.满足气密性要求的车体结构设计优化等。

3.7 高速列车界面流动控制气动减阻

采用改进型延迟分离涡模型,得到列车周围瞬态流场的精细结构:高速列车附面层厚度随着列车长度的增加而增厚;附面层在头车靠近流线型过渡部位出现分离,随后附面层迅速增厚;附面层引起的摩擦阻力占总气动阻力的一半左右。因此,通过附面层控制减阻具有很大的潜力,进而提出高速列车界面流动控制减阻方法:考虑吹-吸气口位置距离气流分离位置不同距离、吹-吸气口形状尺寸圆孔直径及阵列参数、吹-吸气速度等变量,提出头、尾车流动分离区域吹-吸气方法,实现附面层延缓分离,从而达到列车减阻的目的。

3.8 高速列车气动降噪

随着列车运行速度的提高,气动噪声成为高速列车主要噪声源,严重影响车内外环境。为了降低高速列车气动噪声,开发了高速列车边线噪声测试技术、噪声源相控声阵列测试技术、车内外噪声源分离识别技术、振动噪声及声学故障诊断技术;建立了高速列车噪声成分分解模型,探明了气动噪声传递、声能与列车速度等相关规律,得到了高速列车车内外噪声源图谱;提出了阵列实验声学数据处理的反卷积算法,加速了声源周围幅值衰减,极大削弱了声源之间的干涉误差;提出了整体/局部外形的流体声学优化设计、设置声屏障等高速列车降噪措施。

3.9 高速列车通风结构设计优化

合理设计优化空调装置进排风系统,电机电气冷却风道系统,设备舱通风换气系统等各种设备风道是高速列车运行安全和乘员舒适的关键因素。

研究得到了高速列车表面分布压力规律:a.将各种设备风道风口设置在表面压强较稳定的区域,进风口布置在正压强区,排风口布置在负压强区;b.通过设计外形,改变和优化高速列车表面压力分布,满足进排风口位置布置的需要;c.设计优化了各种通风口结构和风道结构,提高了设备冷却风和车内新风的送风均匀性;d.综合列车整体气密性、车厢内流场品质和人体舒适性的要求,提出了新/排风控制策略。

4 列车/隧道耦合空气动力学研究进展

以乘客安全舒适、列车/隧道/弓网结构安全、隧道口环境降噪为目标,从抑制高速列车车厢内交变气压,降低隧道内瞬变气动冲击压力、减小气压爆波、控制隧道内火灾烟流扩散及引导乘客逃生的思路入手,提出人/车/隧/环境耦合空气动力理论模型与控制方法,形成列车/隧道耦合空气动力安全技术,完成中国高速铁路重大工程中各类型的隧道断面、各种缓冲结构、280余座典型隧道和CRH系列高速列车/隧道耦合空气动力效应的分析、评估和优化,实现了气压爆波减小50%、瞬变压力降低10%~35%^[14-17]。

4.1 单列车穿越隧道时列车周围流场特性

高速列车穿越隧道过程中,由于边界突变,绕列车运动的气流受到隧道壁面的制约形成压缩波、膨胀波,这两种波在隧道内以音速传播。压缩波和膨胀波的不断产生和传播、在隧道内壁/列车外壁/隧道进出口等之间不断以音速反射、连续叠加和激发,形成复杂波系。从而导致隧道内空气压力发生剧烈变化。图1为单车过隧道时列车周围流场分布图,从图中可知,列车两侧流场不对称,这样列车会承受侧向力和侧滚力矩。

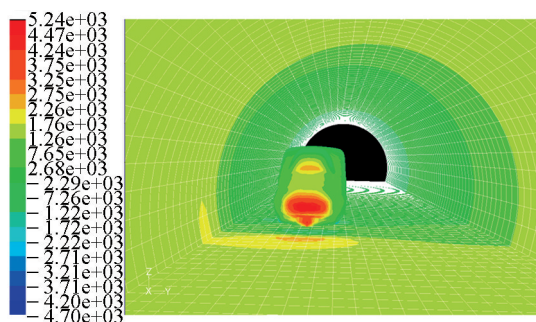


图1 单车过隧道时列车周围流场
Fig. 1 Flow field around single train in tunnels

4.2 隧道内列车车厢内流场特性

当列车通过隧道或在隧道内交会时,将产生较大的空气压力波动,此压力波动传入车厢内,乘员会感到不舒适,轻者压迫耳膜,重者头晕恶心,甚至造成耳膜破裂,与乘飞机情况类似,给旅客乘坐舒适性带来严重影响。为了减少车内受车外压力波动的影响,保证旅客的舒适度,就需要采取措施改善车内压力变化。由此,提出了拟制车厢内压力剧烈波动的瞬变压力/车辆气密性/车体刚度匹配技术。

4.3 列车在隧道内交会瞬态流场特性

列车在隧道内交会,由于两列车分别从隧道两端进出隧道瞬间,都会产生压缩波与膨胀波,再加上列车交会引发的空气压力冲击波,各种波在隧道内传播过程中相互叠加并在隧道口进行反射,形成的波系比单列车过隧道更为复杂。图2为列车在隧道内交会瞬态流场。由此可见,两相对运行动车组交会时,由于列车周围空气受到隧道壁面制约,空气压力冲击波不像在明线交会时能及时扩散,故在隧道内交会产生的压力变化幅值远大于明线交会。

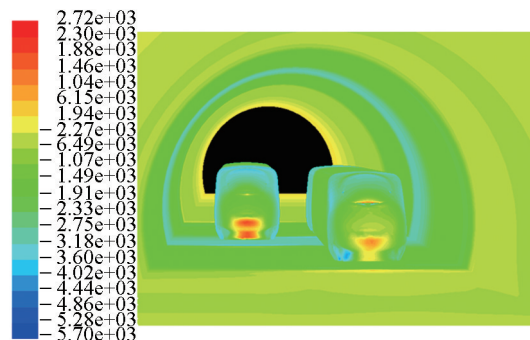


图2 列车在隧道内交会瞬态流场
Fig. 2 Transient flow field of passing trains in tunnels

4.4 高速列车/隧道空气压力波系理论

针对高速列车/隧道耦合空气动力学理论研究的三大难题:空气压力复杂波系精确描述、强非线性脉冲波捕捉、车内外压力映射,建立了高速列车/隧道空气压力波系理论分析方法。

1)综合考虑车体刚度、车体气密性,建立车厢内外交变气压传递数学模型(见式(1)),突破了传统模型不能反映车体刚度对车内压力影响的局限。

$$P(x,y,t) = af(x,t) + bf(x,y) \quad (1)$$

式(1)中, $P(x,y,t)$ 为同时考虑车体刚度、气密性时的车内压力变化; x 为车外压力变化幅值; y 为车体自

振频率; t 为泄压时间; $f(x, t)$ 为大刚度下车内气压变化率; $f(x, y)$ 为刚度影响时全密封车体的车内气压变化率; a 为车体刚度对车内压力的影响因子, 一般取值为 1; b 为车体气密性对车内压力的影响因子, $b = \frac{f(x, y)^2}{[f(x, y) + 1.5f(x, t)]^2}$ 。

2) 提出三维可压非对称滑移分区理论和自适应尺度模型。

4.5 列车/隧道耦合气动设计参数理论

建立隧道长度、隧道面积、相邻隧道洞口间距、列车长度、列车横断面积等与隧道及列车表面压力变化、隧道出口气压爆波的关系, 归纳出最不利运行工况、最不利隧道长度和列车长度等。

1) 发现当列车速度大于 250 km/h, 非线性脉冲波从隧道口向外传播, 能量不断衰减并向高频转移, 经典的气压爆波与距离的反比关系不再成立, 经理论分析与实验研究, 提出了如下关系式:

$$\Delta P = \frac{\lambda}{ad^c} \left[\frac{dP_{bc}}{dt} \right]_{ex} \quad (c=0.80 \sim 0.90) \quad (2)$$

2) 单列车过隧道最不利隧道长度的计算公式:

$$L_{TU} = \frac{1 + Ma}{Ma} L_{TR} \quad (3)$$

3) 列车在隧道内交会, 最不利双线隧道长度的计算公式:

$$L_{TU} = \frac{(1 + Ma)}{2Ma(1 - Ma)} L_{TR} \quad (4)$$

4) 隧道内交变压力极值点位置与列车及隧道长度关系的计算公式:

$$L_d = \min \left\{ \begin{aligned} &2(i + 1)L_{TU} Ma(1 + Ma)^{-1} \\ &(2(i + 1)L_{TU} Ma - L_{TR})(1 - Ma)^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (i=0, 1, 2, 3) \quad (5)$$

式(2)~式(5)中, ΔP 为隧道出口气压爆波; λ 为隧道口辐射系数; d 为距隧道出口的距离; $\left[\frac{dP_{bc}}{dt} \right]_{ex}$ 为隧道出口压力梯度; L_{TU} 为隧道长度; L_{TR} 为列车编组长度; Ma 为马赫数; L_d 为隧道内交变压力极值点位置距隧道入口距离。

4.6 隧道气压爆波激化理论及减缓措施

当列车头部进入隧道, 产生的系列压缩波在隧道内传播时, 隧道内气压、密度和温度均会急剧上升, 音速不断增大, 使得后面的压缩波赶上前面的压缩波, 导致隧道内能量积聚, 引起强非线性脉冲波激化, 在隧道口产生爆波。因此, 发现并提出隧道气压爆波新概念。

4.6.1 隧道气压爆波激化理论

1) 提出长大隧道气压爆波的动态重叠、多维分区匹配计算方法(见图3), 解决了隧道内非线性脉冲波激化的计算难题, 实现了长大隧道和曲线隧道气压爆波的求解, 使长大隧道气压爆波求解速度比传统算法提高 5 倍。采用该方法的计算结果与实车实验结果进行比较, 两者吻合较好, 误差在 5% 左右。

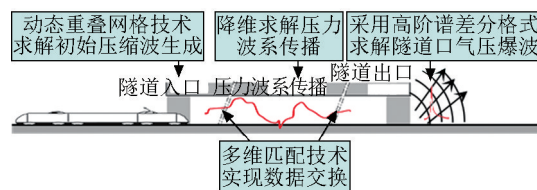


图3 长大隧道气压爆波的动态重叠、多维匹配算法示意图

Fig. 3 Dynamical overlay of blast wave and multi-dimensional matching algorithm

2) 建立始压缩波在长大隧道传播激化修正模型(见图4、公式(6)), 考虑了压力波非线性引起的能量频率转移和大气吸收特性, 实现隧道口气压爆波较精确描述。

$$\frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial \bar{t}^2} - \nabla^2 \bar{p} - \frac{b}{L} f\left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{r}}\right) - \beta f\left(\frac{\partial^2 \bar{p}^2}{\partial \bar{r}^2}\right) = 0 \quad (6)$$

式(6)中, b 为隧道内大气吸收系数, 通过大量的实车实验获得; β 为非线性系数; L 为隧道长度。

4.6.2 隧道气压爆波减缓措施

列车速度、头部外形, 隧道洞门及缓冲结构形式, 竖井、斜井和横通道的位置及形状, 隧道道床形式及隧道壁面粗糙度等对气压爆波均有影响, 通过对影响气压爆波的因素进行分析, 提出减缓气压爆波的缓冲结构设计准则: 阻塞比随缓冲结构长度的变化尽可能平缓。

各种类型洞门阻塞比随缓冲结构长度的变化关系如下: a. 端墙式洞门为垂直阶跃突变; b. 喇叭式洞门依然有突变; c. 斜切式洞门有较大改善, 但一阶导数不连续。由此进一步提出减缓气压爆波的缓冲结构设计准则: 阻塞比与缓冲结构长度变化曲线为一阶导数连续。通过隧道/洞门/缓冲结构等细微结构的曲率变化控制初始压力梯度, 完成不同缓冲结构、洞门、隧道口地形环境等对气压爆波的影响规律研究, 得到最优的洞门、缓冲结构形式: 帽檐斜切式与缓冲结构的组合形式。

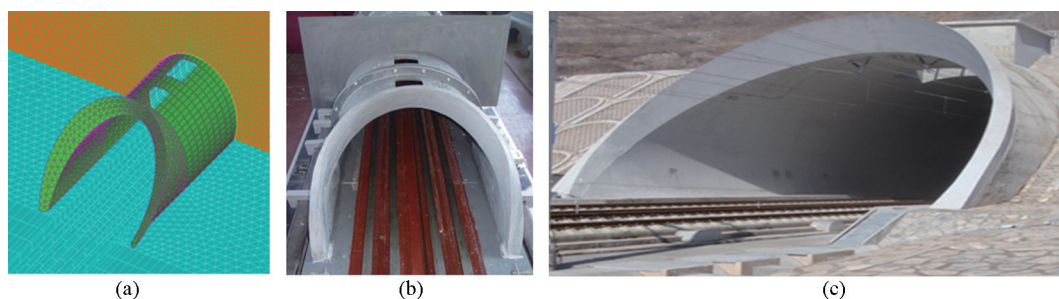


图4 帽檐斜切式与缓冲结构的组合形式

Fig. 4 Combination miter hat style with cushion structure

4.7 列车/隧道火灾逃生分析模型及应急处置技术

隧道火灾是一种综合燃烧、湍流流动和热传递过程的灾害性现象。其发生和发展规律具有随机性和不确定性双重特点。将隧道及车厢内外流场耦合进行考虑,采用动网格技术实现列车携火源运行的数值模拟,分析隧道内烟气流动规律,构建火灾反应全过程分析模型、移动火源下烟气扩散计算分析模型、隧道火灾事故人员疏散模型,提出列车/隧道火灾烟气蔓延控制、火灾危险临界状态预测与乘员疏散应急处置技术。

5 列车/风/沙/雨/雪环境空气动力学研究进展

列车/风/沙/雨/雪环境空气动力学是研究列车风与风/沙/雨/雪环境耦合作用下的列车空气动力学特性、风/沙/雨/雪环境下行车安全保障体系的应用科学。

在开展列车/风环境耦合空气动力学研究基础上,针对影响行车安全的5要素和影响效率的诸多因素,提出并解决了“定阈、提阈、预测、决策”关键科学问题。实现“风/沙/雨/雪环境下铁路安全、高效运输”的目标^[18-20]。

5.1 大风环境下列车空气动力学理论关系式

提出横风风速和列车运行速度之间的耦合关系用“风车速比”来表示,它具体表现为:a.列车速度不变,横风风速改变;b.横风风速不变,列车运行速度改变;c.风速、列车速度均发生变化。

通过对大风环境下列车空气动力学特性、风-车-路耦合空气动力学特性、列车交会空气压力波特性进行动模型实验、数值计算、风洞实验、在线实车实验和理论分析,建立了大风环境下列车空气动力学理论。得到了列车空气阻力系数与风车速比理论关

系式,风速/风向变化时列车空气阻力理论关系式,列车空气升力与小角度侧偏角理论关系式,列车横向力系数与小角度侧偏角理论关系式,路堤高度与气动力的系列理论关系式。

5.2 风/沙/雨/雪环境下列车空气动力学特性

5.2.1 列车单向运行空气动力学特性

大风环境下的列车空气动力学特性包括列车表面压力分布、列车空气阻力特性、车辆空气升力特性、车辆空气横向力特性^[21-26]。

1)列车表面压力分布规律如下:a.列车头部的鼻尖及导流板凹槽内不再为驻点,但仍为较大的正压;b.列车顶面、底部基本为负压,通常列车底部的负压绝对值远小于车顶部的负压绝对值;c.列车侧面的迎风面基本为正压,背风面基本为负压;d.车体侧面的迎风面为较小的正压,背风面为很大的负压,迎风面和背风面的压强叠加后使车体侧面受到非常大的侧压差。

2)列车空气阻力特性规律如下:列车的头车空气阻力系数与风车速比呈二次方关系,而中间车、尾车的空气阻力系数与风车速比呈三次方关系。

3)列车空气升力特性规律如下:列车的头车、中间车和尾车空气升力系数与小角度侧偏角均呈二次方关系增加。降低大风环境下头车和尾车的空气升力,鼓壁侧墙优于直壁侧墙。

4)列车横向力特性规律如下:列车的头车、中间车和尾车空气横向力系数与小角度侧偏角均呈二次方关系增加。降低大风环境下头车和尾车的空气横向力,鼓壁侧墙远优于直壁侧墙。

5.2.2 列车交会空气压力波特性

两交会列车运行速度不尽相同,且两交会列车相向运动,列车风与环境风的耦合产生复杂的流场,无法用简单的侧偏角来说明列车速度与环境速

度的耦合问题,因此,需将大风环境下列车交会问题分解讨论。

1)环境风风速不变,大风风向与列车交会压强波特性规律如下:大风环境下列车交会空气压强波幅值随风向角($0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$)增加呈抛物线形式改变,风向角在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 或 $180^\circ \sim 270^\circ$,交会压强波幅值最大,是无环境风的1.6倍左右;风向角为 0° 时,交会压强波幅值最小,是无环境风的60%左右。

2)环境风风向不变,大风风速与列车交会压强波特性规律如下:风向角为 180° 时,随风速增大,列车交会空气压强波幅值迅速增大;风向角为 0° 时,随风速增大,列车交会空气压强波幅值迅速减小;风向角为 45° 或 315° 时,随风速增大,列车交会空气压强波幅值变化很小;风向角为 135° 或 225° 时,随风速增大,列车交会空气压强波增长幅度最大。

5.2.3 风-车-路耦合空气动力特性

风-车-路耦合空气动力特性规律为:a.车辆横向力系数和倾覆力矩系数的绝对值随小角度侧偏角的增加而迅速增大;b.当侧偏角达到一定值时,车辆横向力系数和倾覆力矩系数的绝对值随侧偏角的增大而增加的趋势变缓;c.在桥上运行使车辆横向力和倾覆力矩增加,桥梁高度越高,车辆横向力和倾覆力矩的绝对值越大;d.车辆横向力系数和倾覆力矩系数的绝对值随路堤高度的增加而呈二次方关系增加。

5.2.4 风-沙(尘)-雨-雪-车耦合空气动力特性

针对风吹沙(尘)、雨、雪等对列车运行安全构成的影响,确定了起沙、扬尘、扬雪临界风速,探明了风沙尘流密度空间分布规律、沙(尘)粒粒径与环境风速关系、风沙沙(尘)粒跃移速度与环境风速关系。发现了车窗玻璃、设备舱、转向架空气弹簧等部件抗风沙、风雨、风雪性能规律。

5.3 铁路沿线局地短时近地风场预测

提出了铁路沿线非平稳跳跃矢量风滚动递推、模型重构的短时预测方法^[27-31],铁路沿线多测风点近地风场点域空间映射技术。实现了铁路沿线近地风场时间高精度预测、空间无盲区监测、全线风速连续时空推演。时间预测精度比传统时间序列法提高一倍以上。

5.4 大风环境下列车运行安全阈值确定方法

以“大风环境下铁路安全、高效运输”为目标,针对影响列车运行安全的风致列车倾覆、车体升重

比超限、网偏致弓网失效、风沙致车窗玻璃破损、局部突发瞬态风致列车剧晃等问题,影响运输效率的线路停轮、列车停运问题,确定与“风力风向/车型/路况/接触网/挡风墙/沿线地形地貌”对应的列车运行安全阈值^[39-45]。

综合安全阈值(车辆倾覆、车体气动升重比超限、网偏致弓网失效、窗玻璃破损、瞬态风致列车晃动等)判定方法用下式表示:

$$D \leq \text{const.} \quad (7)$$

式(7)中, D 为列车运行参数; const. 为列车运行安全阈值。

5.5 大风环境下列车运行安全阈值增强方法

5.5.1 高速列车外形设计优化

采用流线型列车(流线型头形、流线型车身、连接部位外风挡、车体底部除转向架外全部包起等)能够有效地改善大风环境下列车空气动力性能,包括减小列车空气阻力、控制车辆空气动力升力、降低列车交会压力波幅值。合理设计侧壁形状,可以改善车辆横向气动性能。目前,中国在设计大风区高速列车外形与结构时,均考虑了改善风环境下的车辆空气动力性能。

5.5.2 列车结构抗冲击设计

大风扬起的沙石对列车车体、车窗玻璃、设备舱等构成强烈冲击。研究得到了适用于列车车体、车窗玻璃、设备舱等可损伤累积致使破损的材料本构模型参数,提出了强化列车车体、车窗玻璃、设备舱等所能承受瞬态冲击压力、沙石冲击及耦合载荷极限承载能力的方法,并进行了列车结构抗冲击设计及其实验验证,有效提高了列车结构抗冲击安全阈值。

5.5.3 挡风墙设置

提出载荷平衡带域的安全运行速度阈值增强方法。通过在大风区铁路设置挡风墙来控制列车周围流场涡结构,找出载荷平衡带域,以实现列车安全运行速度阈值的增强。挡风墙设置应综合考虑如下因素:a.挡风墙形状;b.挡风墙高度;c.挡风墙与轨道间的距离;d.挡风墙对接触网偏移量的影响;e.挡风墙对铁路复线的1线和2线上的列车气动性能的影响;f.挡风墙对不同车型气动性能的影响;g.地形地貌、线路状况的影响。

5.6 大风环境下铁路行车安全保障技术

探明风/车/路/网/墙/地形地貌耦合的列车周围流场流动及车辆倾覆机理,建立风/车/路/网/墙/地形

地貌耦合下车辆倾覆、车体升重比超限、网偏致弓网失效等多元要素下车辆气动载荷与姿态响应耦合模型,提出了实时限速行车阈值确定方法,建立了多源异类信息融合、行车指挥安全态势评判技术,建设了多元协同行车安全预警指挥系统。

5.6.1 大风环境下列车安全运行速度限值

列车安全运行速度限值的确定需要考虑各种因素的影响,如风环境(风力、风向、列车周围地貌环境)下的空气动力性能,路况(桥梁、路堤、路堑、直线、曲线、挡风墙等),列车外型,车辆载重,车辆动力性能,车窗承受气动压力能力,空调及通风系统抗风沙尘能力,风沙流对列车车窗玻璃和列车运行稳定性的影响,接触网偏移量,局部突发瞬态风致列车晃动程度等。大风环境下列车安全运行规范是针对线路区域或列车速度等级制定的,因此,各铁路线的速度限值标准不同。对各种车辆可以提出通用安全运行速度限值,对某一个高路堤、高桥梁也可制定相应的列车安全运行速度限值。

5.6.2 大风行车安全预警指挥系统

铁路大风监测预警与行车指挥系统要求:从实时大风监测预警,到形成列车运行速度限制指令,并能实现及时与通过风区的列车进行信息交换,为列车安全通过风区以及大风环境下行车指挥调度提供有效决策。其关键技术主要有:a.铁路沿线局地短时近地风场预测;b.列车(车型、编组、运行状态)-大风(风力风向、测风站位置)-路况-地形地貌环境等多源信息融合与集成处理技术;c.长距离实时风速采集、传输、存储技术;d.风区列车运行实时预警与指挥决策等。

5.7 大风环境下安全行车评估指标体系

在国内外大风环境下安全行车评估指标的基础上,新增提出了车体倾覆系数、车体横向偏移量、车体横向加速度、车体抬升量、车体升重比系数、车体侧滚角、车体摇头角、铁路沿线风沙尘流密度与强度、接触网导线横向与垂向偏移量、接触网承力索横向与垂向偏量、接触网回线横向与垂向偏移量、定位点垂向与纵向振动加速度、定位器绕横向与纵向轴倾角、接触网支柱挠度、接触网导线张力、接触网承力索张力等22项安全行车评估指标。

6 高速铁路弓网空气动力学研究进展

列车明线运行、交会、穿越隧道、在隧道内交会及在风环境下运行时,会产生强烈的空气动力学

用,导致弓网偏移、接触压力发生剧烈变化,由此产生了弓网空气动力学^[38,39]。

研究进展主要有:a.探明了列车明线运行、交会条件下弓网空气动力效应规律,并提出改善措施;b.建立高速列车穿越隧道时隧道-列车-受电弓-接触网多尺度模型、观测基准失稳运动下的接触网支柱振动、动态特征点绝对风偏量的检测模型;c.研制可测量列车高速进出隧道时受电弓所受气动升力的测力天平,实现列车穿越隧道时受电弓装置整体所受气动升力的测量;d.研制接触网偏移量机器视觉检测系统,实现接触网偏移量在线实时检测;e.发现高速列车穿越隧道时弓网气动力变化特性规律,隧道长度、截面形状、缓冲结构等参数对弓网气动性能影响规律,列车速度、外形、编组长度、受电弓安装位置、受电弓外形、参数对弓网气动性能影响规律等;f.得到高速列车在隧道内交会时弓网气动性能;g.探明风环境下接触网偏移量变化规律;h.完成受电弓导流罩外形优化。

7 高速铁路人体空气动力学研究进展

列车在地面高速运行时将带动列车侧面、底部及尾部的周围空气运动,形成列车风。处于列车风中的人体将受到气动纵向力、侧向力、升力及其相应的气动力矩作用。通过大量的实车实验、动模型实验、数值计算、理论分析,建立了列车风风速、人体承受的作用力、人体距列车侧壁距离、列车运行速度、列车外形、人体姿态等相互关系:a.列车风对人体作用力与侧向距离的关系;b.列车风对人体作用力与列车运行速度的关系;c.不同车型列车风与人体作用力的关系;d.人体姿态与人体气动力的关系;e.列车风风速与列车侧向距离的关系;f.列车风风速与列车运行速度的关系。提出了人体安全退避距离评价参考标准,包括人体允许承受的气动力和风速建议值、200 km/h 等级线路在列车通过时的人体安全退避距离。

列车高速明线交会、穿越隧道及在隧道内交会时诱发的压力波传入车厢内,给乘员舒适性带来影响。研建了可模拟车厢内空气压力波动过程的实验装置,并进行了大量的实车实验和实验室实验,建立列车车厢内压力波动与车型、列车速度、隧道结构参数之间的关系,提出了中国人体舒适性标准建议值。

风环境下道旁人员受到列车风和环境风的双

重作用,进行了大风环境下高速铁路道旁(包括明线、隧道内、隧道口)人员安全避让距离实车实验,提出了大风环境下高速铁路道旁人员安全避让距离建议值。以提高道旁人员安全性和乘员人体舒适性为目标,建立了人/车/隧/环境耦合空气动力安全协同控制体系,提出相应的方法与标准。

8 高速轨道交通空气动力学专用实验平台群

8.1 轨道交通空气动力特性动模型实验系统

从零做起,于1998年自主建成模型比例与实验速度均处于国际领先水平、与风洞实验互补的高速列车气动特性动模型实验系统(见图5)。



图5 高速列车气动特性动模型实验系统

Fig. 5 Moving vehicle model for aerodynamical force tests

解决了高速列车交会、穿越隧道、通过车站、连续地面效应等模型实验难题。在中国高速列车研制、高速铁路线/隧/站研建的空气动力模型实验中起到不可替代的作用。该系统的列车交会实验速度达500 km/h 交会500 km/h,模型比例分别为1:8~1:25等。

利用该系统开展的实验研究主要有:a.高速列车空气动力特性实验。包括高速明线运行和穿越隧道时的列车空气阻力、交会压力波、列车表面空气分布压力、车辆空气升力、车辆空气横向力等实验;b.隧道、隧道群、竖井、横通道及其附属结构空气动力效应及减缓措施实验;c.隧道气压爆波特性及缓解实验;d.高速列车通过车站空气动力学实验;e.高速列车通过风/声屏障、挡风墙空气动力效应实验;f.列车与隧道火灾烟流及其移动火源灾害实验。

根据大量动模型实验结果,重复性实验相对误差不大于3%,与实车实验结果相差不大于5%。

8.2 交变气动压力下人体舒适性/车体刚度/气密性综合实验装置

针对列车高速穿越隧道时产生的交变气动载荷导致车体瞬态气动冲击疲劳问题,于2008年研建了交变冲击气动压力下的人体舒适性/车体刚度/气密性综合实验装置(见图6)。主要创新有:a.通过多源阵列控制车体抽吸动作,以隧道瞬变压力向车内传递数学模型为基础,实现了10 000 Pa范围内周期和非周期的压力瞬变过程模拟;b.采用波形追踪逼近控制技术,真实再现了车内外压力演化过程,实现车体承受气动载荷谱的准确模拟^[40-42]。



图6 交变气动载荷实验装置

Fig. 6 Experimental platform for alternating aerodynamic tests

利用该装置开展的实验研究主要有:a.高速列车乘员人耳舒适性及安全性实验;b.高速列车车体及其部件(包括车窗玻璃、车门、车辆端墙等)气动载荷疲劳强度实验;c.列车高速通过隧道时车内压力波模拟实验;d.高速列车车内流场品质评估实验;e.高速列车车体(包括车门、车窗、通过台、通风装置等)气密性实验;f.交变气动载荷作用下车体车窗与车体结构刚度匹配实验。

8.3 风/沙/雨/雪气动实验平台群

针对恶劣气候环境下高速列车运行安全问题,近几年来研建了风速风向、风沙、风雨、风雪等模拟实验装置(见图7、图8),形成了风/沙/雨/雪气动实验平台群。利用该平台群开展的实验研究主要有:a.起沙、扬雪、扬尘实验;b.风沙尘流密度与风速关系实验;c.风沙尘流密度空间分布实验;d.沙粒、尘土粒径与环境风速关系实验;e.风沙沙粒跃移速度与风速关系实验;f.高速列车车窗玻璃、设备舱、转向架空气弹簧等部件抗风沙、风雨性能及动态冲

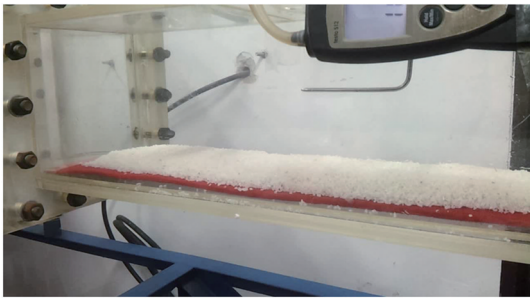


图7 风雪、扬尘实验装置

Fig. 7 Experimental platform for creating snow/wind/sand environment

击疲劳实验;g.风沙、风雨及其交替作用下空调机组承受能力、环境适应性、改型实验;h.高速铁路防灾系统用风速风向传感器环境适应性与标定认证实验;i.高寒动车组转向架抗积雪实验;g.风沙(含尘)/风雨交变环境下高速列车通风系统适应性实验。



图8 风沙、风雨及风速传感器检定实验装置

Fig. 8 Experimental platform for measurement of wind/sand, wind/rain and wind velocity

8.4 高速铁路视觉检测系统

为满足高速铁路越来越多非接触式检测需求,机器视觉检测技术被引入高速轨道空气动力学研究领域,自主开发了高速列车空气阻力,列车运行姿态,风沙、风雪等异物入侵,风致接触网偏移量等机器视觉检测系统。利用该系统开展的实验研究主要有:a.高速列车气动阻力非接触式动模型实验;b.高速列车在风环境、交会、过隧道及在隧道内交会条件下运行姿态实验;c.风沙、风雪等异物上道、埋道事件识别检测与预警;d.风环境下高速铁路弓网状态监测与报警;e.接触网、接触网立柱、辅助导线、承力索偏移量检测等。

8.5 在线实车实验系统

自20世纪90年代以来,开发了涵盖高速列车稳态运行、交会运行、穿越隧道、通过强风沙区四方面、26类实验技术的在线实车空气动力实验系统,

建立了中国120~500 km/h的高速列车/线桥隧/接触网/环境空气动力学实车综合实验体系。

利用该系统开展的实验研究主要有:a.列车空气动力学行车安全评估实验,包括列车交会、列车过隧道、人员安全退避距离、大风环境下车等安全评估实验;b.列车表面压力分布实验,如空调装置进排风口位置、司机室外形局部曲率变化较大处的压力分布以及列车表面压力分布规律实验;c.列车/隧道耦合空气动力学实验,包括列车车厢内外、隧道内的瞬变压力,隧道口气压爆波、隧道内列车风、隧道壁面加速度、隧道内附属设施气动力、隧道口弓网偏移量等;d.列车周围环境实验,包括各种类型挡风墙、桥梁、建筑物压力分布与周围流场测试及其对高速列车运行安全影响实验,环境风风速测试,防风设施防风效果评估实验等;e.列车运行过程中牵引电机冷却风机风量实验,电机、电器冷却风腔百叶窗空气流向及流速测量;f.高速列车车窗玻璃承受风载荷实验;g.大风环境下列车动态偏移量实验;h.大风环境下车辆倾覆稳定性实验;i.大风环境下列车运行安全性实验。

8.6 高速铁路兼用风洞群

目前有一系列可用于高速轨道交通空气动力学实验的风洞群。为了满足长大形状的列车风洞实验,研制了六分量测力专用天平。研究了测力、测压等关键实验技术。研制了解决地板附面层影响的多孔吸气地板。实验模型缩比分别为1:6~1:25等。其中1:6实验模型和1:15的9车编组为国际上最大或最长的。开展的实验研究主要有:a.列车头部形状实验(头部气动性能、头部各型线与气动性能关系、头形研究及定型比选)、部件组合优化实验(车体底部形状、内外风档、受电弓导流罩、导流板、车体截面等)、复杂编组列车研究实验等;b.列车气动阻力、升力、横向力及相应的力矩、列车表面分布压力、列车尾部流场、列车空调系统进排风性能实验等;c.高速铁路挡风墙、风/声屏障、桥梁、防风明洞等表面及其周围环境空气动力性能实验;d.大风环境下风-车-路(路堤、桥、挡风墙等)-网耦合空气动力特性实验。

8.7 数值仿真平台

针对列车与地面间、列车与列车间、列车与隧道间等具有相对运动的大尺度库塔流动、边界突变激发的复杂波系等流场计算难题,自主开发了系列数值计算软件。主要有:a.列车交会、过隧道、在隧

道内交会等具有相对运动的数值模拟计算软件；b.列车气动阻力、升力、横向力、表面压力和周围环境流场三维数值计算软件；c.列车尾流场结构三维分析软件；d.交变气动载荷作用下列车车体流固耦合数值计算软件；e.风/车/路/网/墙/地形地貌耦合数值计算软件；f.长大隧道、曲线隧道内瞬态气动冲击压力及其出口气压爆波数值计算软件。计算结果与实车实验结果比相差10%以内。

9 正在开展的研究和进一步发展的思考

随着社会的不断进步、科学技术迅速发展、列车运行速度进一步提高、以及中国高铁实施“走出去”战略，人们对高速铁路节能环保、运行安全、乘坐舒适性提出了更高的要求。因此，高速轨道交通空气动力学研究领域面临着新的挑战，主要有：a.高速列车进一步节能减阻；b.列车/隧道耦合多激励下气弹效应减缓；c.极端环境下多相流动及相变对轨道交通空气动力影响；d.乘员高舒适性需求下的列车气动环境改善。

正在开展的研究和进一步发展方向主要有：a.高速轨道交通气动性能优化的流动控制技术；b.高速列车减阻降噪的仿生技术；c.面向轻量化设计的高速列车气弹效应抑制技术；d.风沙雨雪冰极端气候条件下行车安全技术；e.特殊地形地貌条件下流场流动机理及控制方法；f.交变压力及噪声下乘员损伤及预防；g.高速轨道交通流场精细化测试技术及设备；h.建设“横风-动模型实验装置”，突破风洞实验无法模拟多体相对运动和动模型实验无法模拟横风环境的技术瓶颈，真实模拟近地风场、高速列车、地面设施以及三者间相对运动，实现三者相对运动为一体的瞬态测量；i.建设轨道交通空气动力学综合实验研究基地。

10 结语

伴随着国家高速铁路的大发展，中国高速轨道交通空气动力学的研究历经了起步、积累、发展、深化、提升、引领6个阶段。提出了以列车空气动力学、列车/线桥隧空气动力学、车/风/沙/雨/雪环境空气动力学、弓网空气动力学、人体空气动力学为主要内容的高速轨道交通空气动力学。创建了7大专用实验研究平台，形成了一套基础理论，突破了系列关键技术，解决了空气动力制约铁路发展、恶劣风环境影响行车安全等关键科学技术问题。

参考文献

- [1] 田红旗.列车空气动力学[M].北京:中国铁道出版社,2007:160-161.
- [2] 田红旗.中国列车空气动力学研究进展[J].交通运输工程学报,2006,6(1):1-8.
- [3] 肖京平,黄志祥,陈立.高速列车空气动力学研究技术综述[J].力学与实践,2013,35(2):1-12.
- [4] 田红旗,梁习锋,许平.列车空气动力学性能研究及外形、结构设计方法[J].中国铁道科学,2002,23(5):138-141.
- [5] 田红旗,贺德馨.列车交会压力波三维数值的计算[J].铁道学报,2001,23(3):18-22.
- [6] Tian Hongqi, He Hua. Influence of various factors on the air pressure pulse from passing trains [J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2005, 12(1):60-68.
- [7] 田红旗,姚松,姚曙光.列车交会压力波对车体和侧窗的影响[J].中国铁道科学,2000,21(4):6-12.
- [8] 张健.高速列车最佳头部外形的进一步研究[J].电力机车与城轨车辆,2005,28(2):5-8.
- [9] 张健.高速列车动车车头形风洞实验研究[J].流体力学实验与测量,1997,11(2):85-89.
- [10] 梁习锋,田红旗,邹建军.动车组纵向气动风洞实验及数值模拟[J].国防科技大学学报,2003,25(6):101-105.
- [11] 姚拴宝,郭迪龙,杨国伟,等.高速列车气动阻力分布特性研究[J].铁道学报,2012,3(7):18-23.
- [12] 田红旗,周丹,许平.列车空气动力学性能与流线型头部外形[J].中国铁道科学,2006,27(3):47-55.
- [13] 张经强,梁习锋.高速列车外形的气动性能数值计算和头部外形的改进[J].计算力学学报,2003,20(5):631-635.
- [14] 李志伟,梁习锋,张健.竖井对隧道内瞬变压力影响的研究[J].中南大学学报(自然科学版),2011,42(8):2514-2519.
- [15] 李志伟,梁习锋,张健.横通道对缓解隧道瞬变压力的研究[J].铁道科学与工程学报,2010,7(4):37-41.
- [16] 李志伟.辅助工程措施对隧道空气动力效应影响的研究[D].长沙:中南大学,2007.
- [17] 余南阳,梅元贵.高速铁路隧道压力波动主要影响参数研究[J].中国铁道科学,2003,24(6):67-69.
- [18] 田红旗.中国恶劣风环境下铁路安全行车研究进展[J].中南大学学报(自然科学版),2010,6:2345-2442.
- [19] 高广军.强侧风作用下列车运行安全性研究[D].长沙:中南大学交通运输工程学院,2008.
- [20] 任尊松,徐宇工,王璐雷,等.强侧风对高速列车运行安全性影响研究[J].铁道学报,2006,28(6):46-50.
- [21] 田红旗.风环境下的列车空气阻力特性研究[J].中国铁道科学,2008,29(5):108-112.
- [22] 苗秀娟,高广军.不同风向角和地面条件下的列车空气动力学性能分析[J].机车电传动,2006(3):33-35.
- [23] 苗秀娟,高广军.基于DES的车辆横风气动性能模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(7):2855-2860.
- [24] 周丹,田红旗,鲁寨军.大风对路堤上运行的客运列车气动性能的影响[J].交通运输工程学报,2007,7(4):6-9.
- [25] 熊小慧,梁习锋,高广军,等.兰州—新疆线强侧风作用下车辆的气动特性[J].中南大学学报(自然科学版),2006,37(6):1183-1188.
- [26] 周丹,田红旗,杨明智,等.强侧风下客车在不同路况运行的气动性能比较[J].中南大学学报(自然科学版),2008,39(3):554-559.
- [27] Liu Hui, Tian Hongqi, Li Yanfei. Short-term forecasting optimization algorithms for wind speed along Qinghai—Tibet railway based on different intelligent modeling theories[J]. Journal

- of Central South University of Technology, 2009, 16(4): 690–696.
- [28] Liu Hui, Tian Hongqi, Chen Chao, et al. A hybrid statistical method to predict wind speed and wind power[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(8): 1857–1861.
- [29] 刘 辉. 青藏铁路运行安全保障系统大风预测优化算法及推广应用研究[D]. 长沙: 中南大学交通运输工程学院, 2008.
- [30] 刘 辉, 田红旗, 李燕飞. 基于小波分析法与滚动式时间序列法的风电场风速短期预测优化算法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2010, 41(1): 370–375.
- [31] 潘迪夫, 刘 辉, 李燕飞, 等. 青藏铁路格拉段沿线风速短时预测方法[J]. *中国铁道科学*, 2008, 29(5): 129–133.
- [32] 高广军, 田红旗, 姚 松, 等. 兰新线强横风对车辆倾覆稳定性的影响[J]. *铁道学报*, 2004, 26(4): 36–40.
- [33] Suzuki M, Tanemoto K, Maeda T. Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91: 209–218.
- [34] Bettle J, Holloway A G L, Venart J E S. A computational study of the aerodynamic forces acting on a tractor-trailer vehicle on a bridge in cross-wind[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 9: 573–592.
- [35] 马淑红, 马毓娟. 瞬时风速对高速列车安全运行的影响及其控制[J]. *铁道工程学报*, 2009(1): 11–16.
- [36] 葛盛昌, 蒋富强. 兰新铁路强风地区风沙成因及挡风墙防风效果分析[J]. *铁道工程学报*, 2009(5): 1–4.
- [37] 韩万水, 陈艾荣. 风环境下行驶于大跨度桥梁上的车辆安全评价及影响因素研究[J]. *空气动力学学报*, 2008, 26(4): 466–472.
- [38] 郭迪龙, 姚拴宝, 刘晨辉, 等. 高速列车受电弓非定常气动特性研究[J]. *铁道学报*, 2012, 34(11): 16–21.
- [39] 田志军. 电气化铁路接触网防风技术研究[J]. *建设机械技术与管理*, 2007(7): 100–103.
- [40] 王前选, 梁习锋, 刘堂红, 等. 高速列车车体气动载荷疲劳强度实验装置研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(8): 2885–2890.
- [41] 王前选, 梁习锋, 高广军. 高速列车车体交变气动载荷实验装置研究[J]. *铁道学报*, 2013, 35(8): 29–34.
- [42] 王前选, 梁习锋, 任 鑫. 列车高速通过隧道时车内压力波模拟实验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(5): 1699–1704.

Development of research on aerodynamics of high-speed rails in China

Tian Hongqi

(1. Key Laboratory of Traffic Safety on Track of Ministry of Education, Central South University, Changsha 410075, China; 2. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

[Abstract] The paper summarizes start, growth, accumulation, development, improvement, and leadership of the research on aerodynamics of high-speed rails in China, which focuses on train aerodynamics, vehicle-track-bridge-tunnel coupling aerodynamics, vehicle-wind-sand-rain-snow environmental aerodynamics, pantograph-catenary aerodynamic and body aerodynamics. It is devoted to finding the mechanism of formation, building fundamental theorem, creating technical breakthrough, proposing measures to tackle aero dynamical problems which pose a threat to development of high-speed railways and safety of operation, and realizing their engineering application. The paper introduces a series of experimental platforms for testing aerodynamics of high-speed rails and novel experiments we have accomplished, including moving vehicle model tests, human comfort/vehicle body stiffness/air tightness tests under alternating pressure, aero dynamical experiments in wind/sand/rain/snow coupling environment, vision inspection systems, experimental platform for full-scale vehicles, private/public wind tunnel and high-availability clusters for numerical simulation. Finally it discussed the ongoing research and our thoughts about further development.

[Key words] rail aerodynamics; high-speed rails; experimental platforms; research development; train aerodynamics; train/tunnel coupling aerodynamics; train/wind coupling aerodynamics; pantograph-catenary aerodynamics; human aerodynamics